

NGHIÊN CỨU CẤU HÌNH TỐI ƯU CỦA VẬT LIỆU TỪ

THE FAVORABLE OPTIMAL CONFIGURATION OF MAGNETIC MATERIALS

Nguyễn Thị Thảo¹, Lâm Huỳnh Quang Phương¹, Bùi Thị Minh Tú²

¹Lớp 09ĐT2, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; Email: ngthithao09dt2@gmail.com, phuongdn91@gmail.com

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; Email: btmt81@yahoo.com

Tóm tắt - Vật liệu từ được chia nhỏ thành các miền từ hóa, lớp ngăn cách giữa chúng là các bức tường. Tồn tại ba dạng cấu trúc miền cơ bản: miền đơn, miền kép và miền đóng. Với những phân tích và đánh giá cụ thể, chúng tôi chứng minh được cấu trúc miền đóng là tối ưu nhất. Đó là cấu trúc hình chữ nhật gồm hai miền chính và hai miền đóng được ngăn cách bởi các bức tường 1800 và bức tường 900. Khi không có từ trường ngoài, hệ thống đạt trạng thái bền vững với tổng năng lượng nhỏ nhất. Dưới tác động của từ trường ngoài, hệ thống sẽ thay đổi để tiến đến một trạng thái cân bằng mới bằng cách dịch chuyển các bức tường. Trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất mô hình dịch chuyển bức tường 1800 song song vị trí ban đầu và giữ tất cả các góc giữa hai bức tường là tối ưu nhất.

Từ khóa - miền từ hóa; bức tường; năng lượng từ tĩnh; cấu trúc miền từ hóa đóng; từ hóa bão hòa; spin

1. Đặt vấn đề

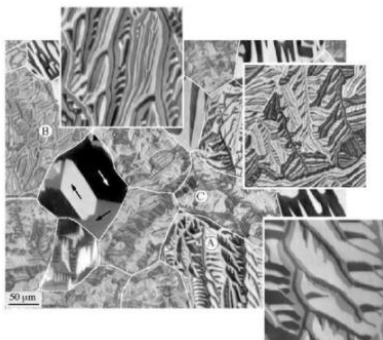
Từ học là một trong những lĩnh vực lâu đời nhất của vật lý, bắt nguồn từ hơn 3000 năm trước, khi người Trung Quốc phát minh ra nam châm. Từ đó, những nghiên cứu về từ được bắt đầu và phát triển mạnh mẽ. Những ứng dụng của từ có thể bắt gặp ở khắp mọi nơi, từ mô tơ điện tới biến áp, nam châm vĩnh cửu, từ các loại thiết bị điện tử đến ổ cứng lưu trữ thông tin...[4]

Với nhu cầu đòi hỏi tính thiết thực và cấp bách của nhiều ngành công nghiệp chế tạo, sản xuất, mà ngày nay, sự nghiên cứu về từ tính cũng như nhiều thuộc tính của nó vẫn không ngừng phát triển. Để minh họa rõ hơn về các đặc tính từ tính, các khái niệm ban đầu hướng đến những ai quan tâm đến lĩnh vực này có thể hình dung ra mô hình mà chúng tôi đang nghiên cứu.

2. Giải quyết vấn đề

2.1. Cấu trúc miền từ hóa

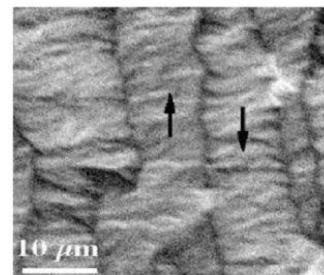
Cấu hình thường quan sát thấy trong một vật liệu sắt từ là cấu hình miền, với việc vật liệu được chia thành một số khu vực đồng nhất của từ hóa như hình 1, 2.



Hình 1. Các miền từ hóa của hợp kim FeSi bề dày 0.5 mm

Abstract - The material is subdivided into magnetic domains. The interface layers, known as domain walls, separate adjacent domains. There are three basic categories of magnetic domain: single domain, multidomain and closure domain. Through specific analysis and interpretation, we demonstrated that the optimal configuration is the closure domain. It is a rectangle, containing two main domains and two closed domains that are separated by 1800 domain wall and 900 domain walls. Without applied field, the system obtains the stable structure when the energy is minimal. Under applied field, the energy balance is altered and rearrangements of the domains structure take place, mainly through the motions of domain walls. In this paper, we proposed that moving 1800 domain walls parallelly with initial location while reserving α is optimal. In that, α is angle between two domain walls.

Key words - magnetic domain; domain wall; magnetostatic energy; closure domain; spontaneous magnetization; spin



Hình 2. Cấu tạo từ của Co bề dày 6 nm

Một miền từ hóa bao gồm các spin từ sắp xếp song song để đạt đến từ hóa bão hòa dưới tác dụng của trường phân tử. Tuy nhiên, chiều từ hóa là khác nhau giữa các miền trong vật liệu. Tổng từ của các miền định hướng khác nhau dẫn đến một từ hóa xấp xỉ không của vật liệu khi không chịu tác động từ bên ngoài.

Một bức tường bao gồm các spin nằm trong vùng chuyển tiếp giữa các miền có các hướng từ hóa khác nhau. Các bức tường có thể được phân loại theo sự thay đổi của spin của nó (tường Bloch và Neel) hay sự khác biệt giữa hai miền từ hóa (tường 180° và tường 90°) [2].

2.2. Năng lượng hệ thống và tiêu chí đánh giá hệ thống

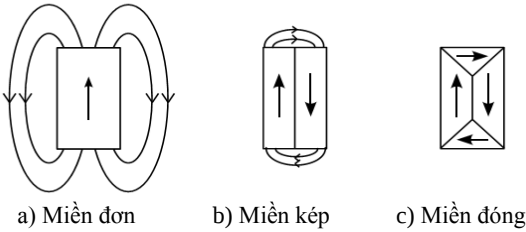
Ta chia một mẫu vật của vật liệu thành những thể tích thành phần ΔV . Các thể tích này phải đủ nhỏ để ta có thể giả thiết rằng các đặc tính vật lý của vật liệu trong nó là đồng nhất. Đồng thời, các thể tích này cũng phải đủ lớn để có thể biểu diễn được cho vật liệu nói chung. Giả thiết rằng các điều kiện này đã được thỏa mãn, ta sẽ tính năng lượng trong các thể tích thành phần này nhằm mục đích tính năng lượng tổng của mẫu vật.

Năng lượng của hệ thống là tổng các năng lượng thành phần: năng lượng hoán đổi, năng lượng tinh thể từ không đẳng hướng, năng lượng đàn hồi từ, năng lượng từ tĩnh (năng lượng Zeeman và năng lượng khử từ) [2].

Mỗi một vật liệu từ đều có một năng lượng nhất định, năng lượng ấy nhỏ hay lớn tùy thuộc vào cấu hình miền từ hóa bên trong vật liệu. Một hệ thống đạt trạng thái ổn định và bền vững khi tổng năng lượng hệ thống là thấp nhất. Có nhiều dạng cấu trúc miền từ hóa và ứng với mỗi cấu trúc ấy, hệ thống có năng lượng tương ứng khác nhau. Điều ta mong muốn là mô hình nào có mức năng lượng tối thiểu nhất. Ngay cả khi hệ thống chịu tác động bên ngoài, hệ thống luôn có xu hướng thay đổi để trở về trạng thái có mức năng lượng tổng thấp nhất. Như vậy, năng lượng là tiêu chí quan trọng để đánh giá các mô hình vật liệu từ.

2.3. Các dạng cấu trúc miền từ hóa

Có những dạng cấu trúc miền từ hóa cơ bản sau:



Hình 3. Các dạng cấu trúc miền

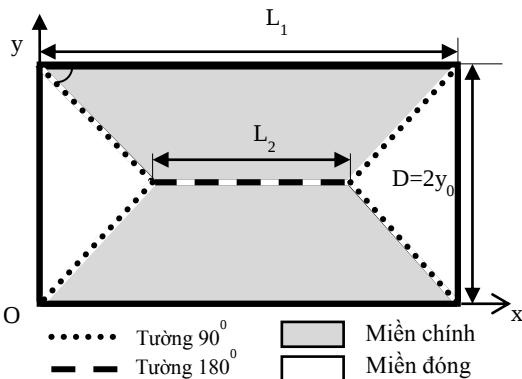
+ Cấu trúc miền đơn: Chỉ gồm một miền từ hóa, nó sẽ được từ hóa đều cho đến khi đạt từ hóa bão hòa (Hình 3a).

+ Cấu trúc miền kép: Gồm nhiều miền từ hóa ghép song song với nhau theo hướng của từ hóa và các hướng từ hóa ngược nhau ở những miền từ hóa gần kề (Hình 3b).

+ Cấu trúc miền đóng: Gồm 2 miền từ hóa chính và hai miền từ hóa đóng, các hướng từ hóa khép kín bên trong cấu trúc miền (Hình 3c).

Năng lượng từ tĩnh có thể được xem như là năng lượng có nguồn gốc từ các đường cảm từ trong không khí bao quanh mẫu vật. Ta có thể dự đoán được cấu hình miền đóng có năng lượng từ tĩnh nhỏ nhất, vì các đường sức từ không bị thoát ra ngoài. Trong phần tiếp theo, ta sẽ chứng minh được như thế.

Xét cấu trúc miền đóng:



Hình 4. Cấu hình miền đóng

Mối quan hệ giữa chiều dài L_1 và chiều rộng D được xác định bằng cách tính giá trị tối thiểu của tổng các năng lượng phát sinh (năng lượng của các bức tường Bloch và năng lượng đàn hồi từ) như sau:

$$D = \sqrt{\frac{2\gamma L_1}{K_1}}. \quad (1)$$

Với γ là mật độ năng lượng của bức tường 180° , K_1 là hệ số đẳng hướng của vật liệu.

Chiều dài L_1 , L_2 , chiều rộng D , và góc α giữa các bức tường 180° và 90° phụ thuộc lẫn nhau theo quan hệ:

$$\tan \alpha = \frac{D}{L_1 - L_2}. \quad (2)$$

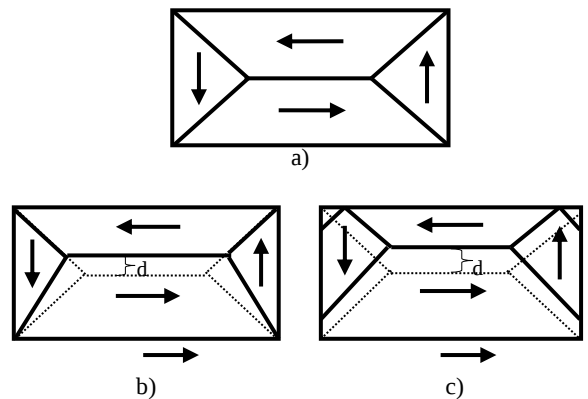
Tồn tại một giá trị của α để cho năng lượng của hệ thống là tối thiểu. Ta có thể tính được góc α này bằng phương pháp phân tử hữu hạn.

2.4. Sự thay đổi cấu hình miền từ hóa đóng dưới tác động của từ trường ngoài

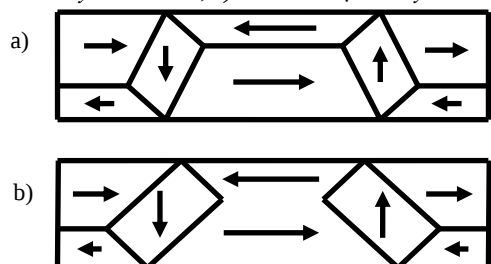
Chúng tôi đã khảo sát và xác định được góc α nói trên. Với một tác động bên ngoài lên hệ thống làm thay đổi sự ổn định của hệ thống bằng cách thêm vào hệ thống một năng lượng bổ sung. Hệ thống tiến đến một trạng thái cân bằng mới tương ứng với một năng lượng tối thiểu mới thông qua sự dịch chuyển các bức tường. Miền nào có chiều từ hóa cùng chiều từ trường thì giãn ra và ngược lại. Khi bức tường dịch chuyển, từ hóa và năng lượng của hệ thống thay đổi ngược nhau. Sự tăng năng lượng Zeeman tương ứng với sự giảm năng lượng từ tĩnh và ngược lại. Xét hai cách dịch chuyển các bức tường cơ bản nhất như hình 5 và có thể mở rộng sang cấu hình tuần hoàn như hình 6:

+ Cách thứ nhất: Dịch chuyển bức tường 180° song song với vị trí ban đầu nhưng không duy trì tất cả các góc α .

+ Cách thứ hai: Dịch chuyển bức tường 180° song song với vị trí ban đầu và giữ tất cả các góc α .



Hình 5. Sự thay đổi cấu hình miền khi có tác động của từ trường ngoài. a) Cấu hình miền ban đầu; b) Cấu hình dịch chuyển thứ nhất; c) Cấu hình dịch chuyển thứ hai



Hình 6. Cấu hình tuần hoàn. a) Cấu hình dịch chuyển thứ nhất; b) Cấu hình dịch chuyển thứ hai

Bằng phương pháp phần tử hữu hạn ta có thể phân tích được cách dịch chuyển nào là tối ưu nhất.

2.5. Phương pháp phần tử hữu hạn

Như đã biết, để giải bài toán từ trường tĩnh, chúng ta phải giải được phương trình Laplace với những điều kiện biên cho trước:

$$\Delta \varphi_M = 0 \quad (3)$$

Tuy nhiên, với những điều kiện và hình dáng biên phức tạp thì việc giải phương trình trên hết sức khó khăn. Vì vậy thực tiễn đòi hỏi phải sử dụng phương pháp gần đúng. Phương pháp phần tử hữu hạn là phương pháp tính gần đúng quan trọng vì dễ tính toán, có thể giải được những bài toán biên phức tạp.

Phương pháp này dựa trên việc sai phân hóa (rời rạc hóa) phương trình Laplace rồi dùng phương pháp đại số để tính gần đúng phân bố bằng số của từ thế φ trên các nút lưới. Mức độ chính xác phụ thuộc vào cách sai phân.

Nội dung cơ bản của phương pháp phần tử hữu hạn là sử dụng phương pháp lặp để tìm dần ra sự phân bố của từ thế trên các nút sao cho thỏa phương trình Laplace sai phân theo điều kiện biên cho trước. Đầu tiên, dựa vào phân bố từ thế trên biên, ta phỏng chừng sự phân bố từ thế trên các nút. Những số liệu ghi lần thứ nhất chưa thể đúng ngay nên phải lặp để hiệu chỉnh dần. Cứ thế tiếp tục cho đến khi φ_i^n tính lần thứ n sai khác với φ_i^{n-1} ở lần trước đó một sai số cho phép.

Về nguyên tắc, ở lần đầu có thể chọn tùy ý giá trị φ_i , nhưng chọn càng khéo thì quá trình lặp càng rút ngắn.

Muốn tính nhanh và chính xác, ta còn có thể thay đổi bước sai phân. Những lần đầu dùng bước sai phân lớn, tìm ra kết quả với sai số nào đó rồi lại thay bằng bước sai phân bé hơn sau đó lặp lại cho đến khi đạt sai số mong muốn [1]. Trong nội dung bài viết này, công cụ chúng tôi sử dụng để mô phỏng phương pháp phần tử hữu hạn là FEMM (Finite element method magnetics).

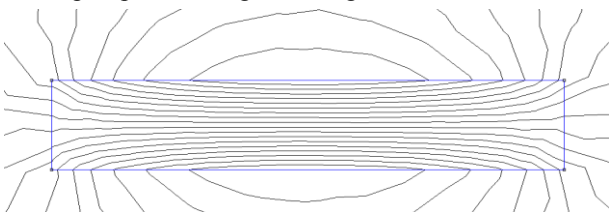
3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

3.1. Chứng minh cấu hình bền vững của vật liệu

3.1.1. So sánh năng lượng ba cấu hình cơ bản

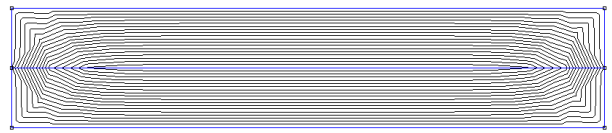
a. Cấu hình miền đơn

Ta sẽ mô phỏng cấu hình này bằng FEMM và nhận được tập hợp các đường sức trong vật liệu như hình 7.



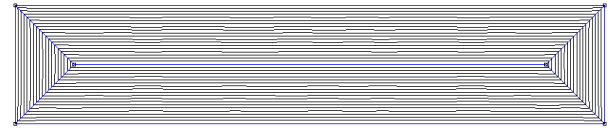
Hình 7. Miền đơn

b. Cấu hình miền kép



Hình 8. Miền kép

c. Cấu hình miền đóng



Hình 9. Miền đóng

Kết quả mô phỏng ba cấu hình trên có thể thu gọn như trong bảng 1.

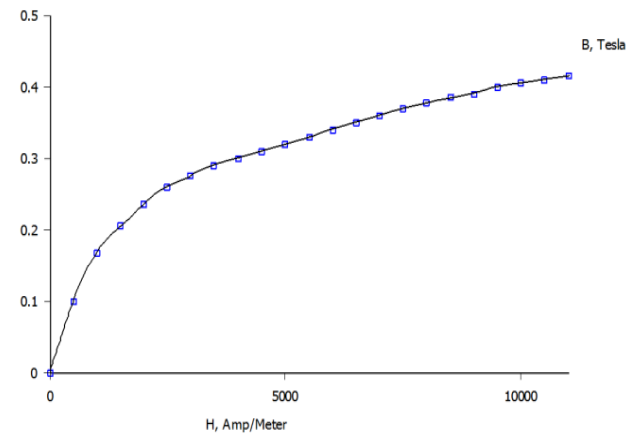
Bảng 1. So sánh năng lượng của các dạng cấu trúc miền

Cấu trúc	Năng lượng
Miền đơn	1.07 e-014 J
Miền kép	1.30 e-015 J
Miền đóng	2.16 e-029 J

Rõ ràng là từ bảng trên ta có thể khẳng định lại dự đoán định tính trong phần trước là **cấu hình miền đóng như hình 3c là cấu hình có năng lượng cực tiểu** hay nói cách khác, đây là cấu hình bền vững của vật liệu sắt từ.

3.1.2. Cấu hình ban đầu của hệ thống

Giả thiết cấu trúc miền của một vật liệu có dạng tinh thể khối đối xứng được đặt trong không khí. Độ dày mẫu là 1μm. Các thông số cần thiết khác là các thông số của vật liệu từ tính: từ trường cường độ H_C , và đường từ trễ B-H và thông số này phụ thuộc vào vật liệu ta sử dụng. Vật liệu ta dùng để mô phỏng là martensite có đường B-H như hình 10.

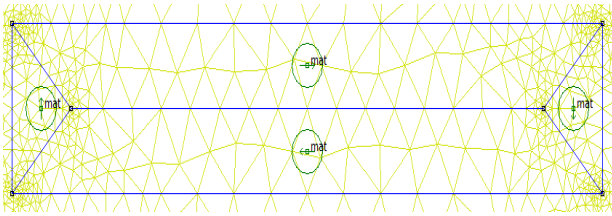


Hình 10. Đường cong từ hóa của vật liệu martensite

Các góc α giữa tường 90° và trục Ox là:

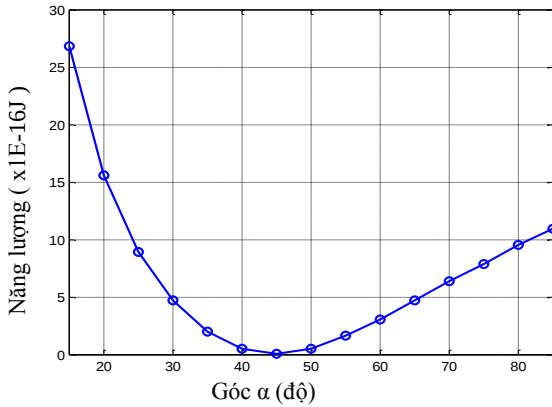
$$\alpha = \arctan \left(\frac{2y_0}{L_1 - L_2} \right). \quad (4)$$

Tham số mô phỏng: $L_1 = 20\mu\text{m}$, $D = 2y_0 = 2\mu\text{m}$.



Hình 11. Hệ thống lưới phương pháp phần tử hữu hạn

Khi cho góc α thay đổi, ta nhận được kết quả như sau:



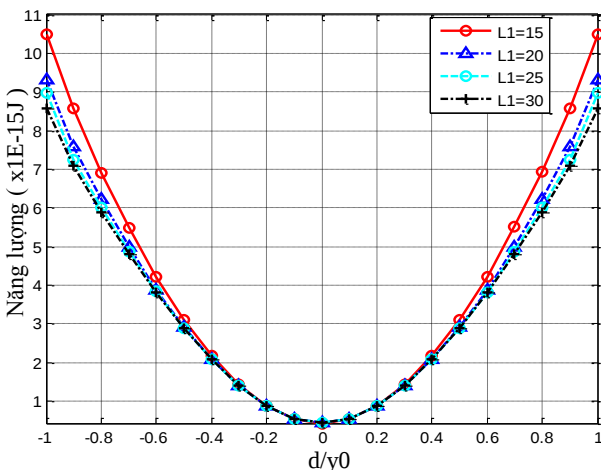
Hình 12. Năng lượng hệ thống theo α

Từ hình 12 ta có thể thấy năng lượng là một hàm theo góc α giữa trục Ox và bức tường 90° . Năng lượng nhỏ nhất tại $\alpha = 45^\circ$ hay $D = 2y_0 = L_1 - L_2$. Bằng cách thay đổi L_1 rồi thực hiện tương tự, ta thấy rằng nhận định trên vẫn đúng mà không phụ thuộc vào quy mô của mẫu vật.

3.2. Mô hình tối ưu cho sự di chuyển của các bức tường

3.2.1. Cách dịch chuyển thứ nhất

Các bức tường dịch chuyển song song bảo toàn độ dài L_2 nhưng không duy trì tất cả giá trị các góc $\alpha=45^\circ$ như hình 6a, d là khoảng dịch chuyển bức tường so với vị trí ban đầu. Ta mô phỏng ứng với trường hợp L_1 thay đổi, $D = 2y_0 = 2\mu\text{m}$. Kết quả nhận được như hình 13.



Hình 13. Năng lượng thay đổi theo d (cách thứ nhất)

Nhận xét:

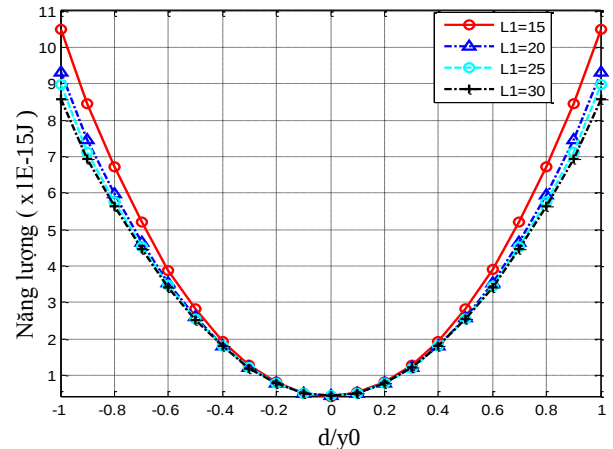
- Năng lượng tăng theo d và đối xứng qua $d=0$.
- Năng lượng là hàm bậc hai của d .
- Cùng một giá trị của d , L_1 tăng thì năng lượng giảm.

3.2.2. Cách dịch chuyển thứ hai

Các bức tường dịch chuyển song song bảo toàn độ dài L_2 duy trì tất cả giá trị các góc $\alpha = 45^\circ$ (hình 6b).

Từ hình 14, ta cũng có thể rút ra những nhận xét tương tự như đã trình bày:

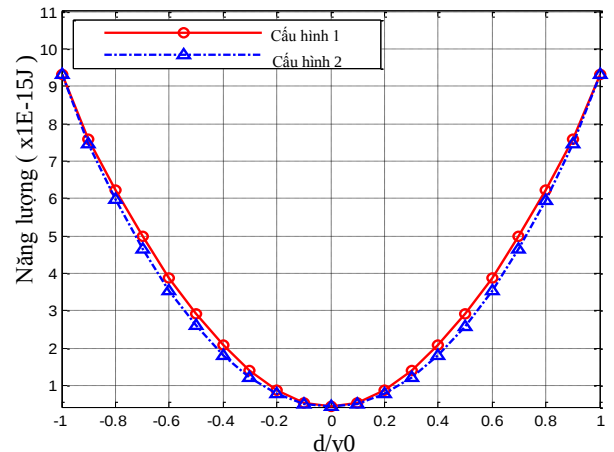
- Năng lượng tăng theo d và đối xứng qua $d=0$.
- Năng lượng là hàm bậc hai của d .
- Cùng một giá trị của d , L_1 tăng thì năng lượng giảm.



Hình 14. Năng lượng thay đổi theo d (cách thứ hai)

3.2.3. So sánh hai cách dịch chuyển

Ta so sánh hai cách di chuyển trong trường hợp $L_1 = 20\mu\text{m}$, $D = 2y_0 = 2\mu\text{m}$ ở cả hai cấu hình.



Hình 15. So sánh hai cấu hình dịch chuyển

Nhận xét:

- Tại $d=0$ và $d=1$, hai cấu hình giống hệt nhau nên năng lượng như nhau.
- Ứng với mỗi giá trị d , năng lượng ở cấu hình hai nhỏ hơn so cấu hình một.

Từ đó, ta có thể kết luận rằng, khi có từ trường, các bức tường dịch chuyển và cấu trúc miền thay đổi như cấu hình thứ hai.

Sở dĩ năng lượng là một hàm bậc hai theo d như trên là do năng lượng từ tĩnh tỉ lệ với bình phương từ hóa bên trong vật liệu, còn từ hóa là một hàm theo d được xác định như sau:

Trước khi bức tường dịch chuyển:

Diện tích S_1 và S_2 trên hình 16 được tính như sau:

$$S_1 = S_2 = y_0 L_1 - y_0^2. \quad (5)$$

$$\Delta S = S_1 - S_2 = 0. \quad (6)$$

Khi bức tường dịch chuyển:

Khi đó diện tích S_1 và S_2 được tính như sau:

$$S_2 = (y_0 - d)(L_2 + y_0 - d). \quad (7)$$

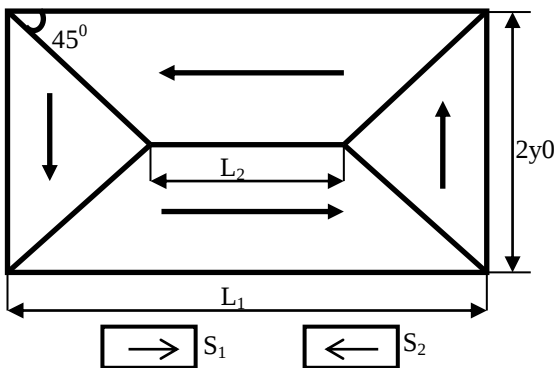
$$S_1 = d^2 + y_0(L_2 + y_0) + d(L_2 + 2y_0). \quad (8)$$

$$\Delta S = S_1 - S_2 = 2dL_1. \quad (9)$$

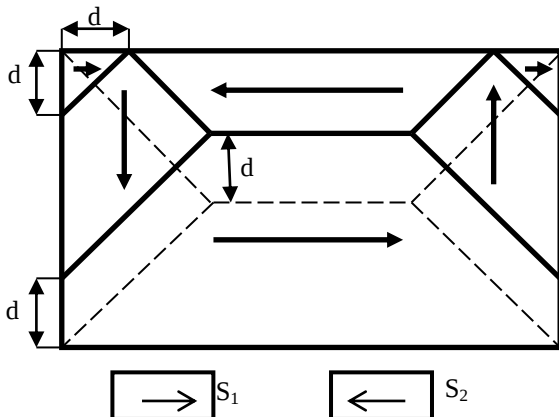
Ban đầu, diện tích S_1 và S_2 bằng nhau nên từ hóa của cấu hình bằng không. Sau khi dịch chuyển, S_1 và S_2 thay đổi dẫn đến trung bình từ hóa khác không và M tỉ lệ với ΔS . Từ đó ta tính được:

$$M = \frac{M_s d}{y_0}. \quad (10)$$

Trong đó M_s là từ hóa bão hòa của vật liệu.



Hình 16. Cấu hình miền ban đầu



Hình 17. Cấu hình miền khi bức tường dịch chuyển

4. Kết luận

Trong phạm vi bài viết này, chúng tôi đã chứng minh được mô hình miền đóng là mô hình tối ưu nhất. Mô hình miền đóng có dạng hình hộp gồm 4 vùng từ riêng biệt với từ hóa đều trong vùng và hướng từ hóa là thay đổi từ vùng từ hóa này sang vùng từ hóa khác. Khi các thông số của mô hình $\alpha = 45^\circ$ hay $L_2 = L_1 - 2y_0$ thì mô hình có năng lượng tối thiểu nhất, khi đó mô hình đạt trạng thái cân bằng và ổn định.

Đó là khi không có từ trường ngoài tác động vào. Dưới một trường ngoài tác động lên mô hình theo hướng dễ từ hóa, các bức tường của mô hình sẽ dịch chuyển sao cho hệ thống đạt một trạng thái ổn định mới với một năng lượng tối thiểu mới. Như trong các phần trước, cách dịch chuyển bức tường 180° song song với vị trí ban đầu và giữ nguyên giá trị của nó; dịch chuyển bức tường 90° song song và giữ nguyên một góc $\alpha = 45^\circ$ là cách tốt nhất.

Khi từ trường ngoài thay đổi tăng dần (hoặc giảm dần), bức tường 180° có xu hướng dịch chuyển về phía hai phía bề mặt vật mẫu. Khi đó, năng lượng từ tĩnh của hệ thống là một hàm bậc 2 theo sự dịch chuyển các bức tường 180° .

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Bình Thành – Nguyễn Trần Quân – Lê Văn Bằng, *Cơ sở lý thuyết trường điện từ*, NXB đại học và trung học chuyên nghiệp, Hà Nội 1970.
- [2] TS. Bùi Thị Minh Tú, *Modélisation du bruit Barkhausen en relation avec la microstructure des matériaux ferromagnétiques*, Ph.D thesis, Université de Technologie de Compiègne, 2010.
- [3] G. Bertotti, "Domain-wall dynamics and Barkhausen effect in metallic ferromagnetic materials. I. Theory", *J. Appl. Phys*, Vol.68, 1990, pp. 2901
- [4] Ngô Đức Thế, "Sơ lược về từ học và vật liệu từ", *Department of Physics and Astronomy, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom*.
- [5] G. Bertotti, *Hysteresis in Magnetism: for Physicists, Materials Scientist, and Engineers*, Academic Press, 1998.
- [6] Özden Özdemir, Song Xu, David J.Dunlop, "Closure domain in magnetite", *Journal of Geophysical Research*. Vol.100, No. B2, 1995, pp 2193-2209.
- [7] DA Alwood, G. Xiong, C.C Faulkner, "Magnetic Domain – Wall logic", *Journal of Original Scientific Research*, Vol. 309, No. 5741, 2005, pp 1688-1692.
- [8] Samson Abramsky, Achim Jung, "Domain Theory", 1994.
- [9] C Kittel, JK Galt, "Ferromagnetic Domain Theory", *Solid State Physics*, 1956, Elsevier.
- [10] P Aguado – Puente, J Junquera, "Ferromagneticlike closure domains in ferroelectric ultrathin films: first – principles simulations", *Physical review letters*, 2008, APS.

(BBT nhận bài: 07/05/2014, phản biện xong: 11/06/2014)